

探测通信一体化研究现状与发展趋势

卢 俊 张群飞 史文涛 张玲玲
(西北工业大学航海学院, 陕西西安 710072)

摘 要: 探测通信一体化将独立的探测与通信系统集成一起, 通过共用一套硬件设备实现目标探测与信息传输功能, 相比传统单一的探测与通信系统, 其具有节约平台空间、降低平台能耗以及提高平台安全性等优点。首先介绍国内外陆上雷达通信一体化的相关研究, 以及陆上与水下探测通信一体化的区别。结合水声传感网络的应用背景, 借鉴雷达通信一体化研究技术, 针对探测通信一体化亟需解决的共享波形设计、自干扰抑制以及共享信号处理三个问题, 讨论了水下探测通信一体化在单基地、双基地、信息化、安全性方面的发展应用。无论是陆上还是水下, 探测与通信作为信息系统的两大功能, 两者的一体化设计是系统集成化、信息化、智能化的发展趋势之一。

关键词: 探测通信一体化; 波形设计; 自干扰抑制; 共享信号处理

中图分类号: TJ630. 34; TN911. 7 **文献标识码:** A **DOI:** 10. 16798/j. issn. 1003-0530. 2019. 09. 005

引用格式: 卢俊, 张群飞, 史文涛, 等. 探测通信一体化研究现状与发展趋势[J]. 信号处理, 2019, 35(9): 1484-1495. DOI: 10. 16798/j. issn. 1003-0530. 2019. 09. 005.

Reference format: Lu Jun, Zhang Qunfei, Shi Wentao, et al. Development and Prospect of Detection and Communication Integration[J]. Journal of Signal Processing, 2019, 35(9): 1484-1495. DOI: 10. 16798/j. issn. 1003-0530. 2019. 09. 005.

Development and Prospect of Detection and Communication Integration

Lu Jun Zhang Qunfei Shi Wentao Zhang Lingling

(Northwestern Polytechnical University, School of Marine Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710072, China)

Abstract: Detection and communication integration combined with independent detection and communication system, and realizes target detection and information transmission functions by sharing a set of hardware equipment. Compared with traditional signal detection and communication system, it has the advantages of reducing platform volume and power consumption, and improving platform security. In this paper, the research on land radar and communication integration at home and abroad is introduced, and the difference with the underwater detection and communication integration. According to the application background of underwater acoustic sensor network and the research technology of radar and communication integration, the development and application of underwater detection and communication integration in single base, double base, information, and security are discussed for the aspects of shared waveform design, self-interference cancellation and shared signal processing, which are urgently needed to be solved in detection and communication integration. Whether on land or underwater, detection and communication are the main functions of an information system, and the detection and communication integration is the development of system integration, informatization and intelligence.

Key words: detection and communication integration; waveform design; self-interference cancellation; shared signal processing

收稿日期: 2019-05-23; 修回日期: 2019-08-21

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC1400203); 国家自然科学基金(61531015)

1 引言

随着科学技术的高速发展,电子对抗日益严重,为了在对抗中取得更大的生存机会,对作战平台的多功能要求越来越高,探测、通信、电子干扰等各种功能的电子设备被装备在同一平台上,占据了平台大量的空间,增加了平台的反射面积和能耗,恶化了平台周围的电磁环境,降低了隐蔽性,从而影响了平台整体机动性、安全性等性能。因此,迫切需要将这此独立的设备集成起来,构造综合化程度高的一体化集成系统,增加空间利用率、减小反射面积、降低电磁辐射等,提高整体对抗性能,从而在对抗中获得有利优势。在陆上雷达中,将雷达与通信系统结合的雷达通信一体化系统很早就被提出,且已被用于作战设备中,而水下探测与通信系统长期是独立纵向发展的,无论是陆上雷达还是水下声纳,整合探测与通信系统形成探测通信一体化是设备集成化、智能化的发展趋势。

探测通信一体化基于探测与通信系统在工作原理、系统结构、工作频段以及硬件设备等方面的共性,利用同一共享硬件平台实现目标探测与信息传输功能,实现多种资源的共享以提高系统生存与应变能力。20 世纪 60 年代,Randall 首次提出利用雷达脉冲对通信信息进行调制,利用雷达信号实现通信功能的理念^[1]。在 20 世纪 70 年代,美国海军研究实验室在切萨皮克海湾西边和距离 9 公里的 Tilghman 岛上利用 SENDRAD 雷达搭建雷达通信验证系统,验证了利用雷达进行通信的可行性^[2],从此对雷达通信一体化的研究越来越受到关注。现阶段的探测通信一体化研究主要基于陆上雷达,而基于水下声纳的探测通信一体化研究还处于起步阶段。

本文首先对现有的雷达通信一体化相关研究方向与技术方法进行总结,主要从共享波形设计优化、自干扰抑制以及信号处理三个方面进行详细阐述,借鉴雷达通信一体化技术、水声环境特点以及所在课题组研究方向,对水下探测通信一体化研究及发展趋势进行讨论。

2 探测通信一体化工作体制

现有的陆上雷达通信一体化系统工作体制可

以分为:分时体制、分频体制、分波束体制、全共享体制。分时体制将信号划分多个时序,利用转换开关,在不同时序发射探测信号或通信信号,同一个时序内不能同时发射探测与通信信号。分频体制利用不同频段分别实现探测与通信功能。分波束体制主要用于相控阵雷达,将相控阵雷达的阵面划分不同的区域,同时形成不同波束,分别用于探测与通信等不同的功能。全共享体制指探测与通信使用同一共享波形,共享波形同时被用于目标探测与通信功能。四种体制的优缺点如下图 1 所示。

分时体制与分波束体制由于探测与通信在时域或空域分开实现,相互间的干扰小,实现简单,早期研究较多。文献[3]利用数字频率合成 DDS(direct digital synthesis)分别输出调频雷达信号和二进制相移键控 BPSK(binary phase shift keying)调制通信信号,在一个周期内,前 3/4 周期用于探测,后 1/4 周期用于通信,探测与通信在不同时间完成,实现分时体制的探测通信一体化。基于分波束体制,美国雷声和诺·格公司在 F-22 与 BAC-11 战机上利用相控阵雷达实现了 274 Mbit/s 传输速率的试验数据传输^[4]。全共享体制下,由于共享发射信号,探测性能与通信性能可能存在相互制约,如基于探测波形的探测通信一体化,探测波束方向将制约通信传输方向。再者,由于共用发射信号,相互间干扰较大,且探测性能和通信性能对共享波形要求有差异,导致共享信号设计存在矛盾。

由于雷达与声纳存在一定差异,导致雷达通信一体化与水下探测通信一体化在工作体制上的选取存在不同。雷达可用频带宽、阵列孔径大、电磁波传播速度快,使得雷达通信一体化系统常采用分时、分频以及分波束的工作体制,这 3 种工作体制易于工程实现。而对于声纳,由于可用频带窄、阵列孔径小且水声传播速度慢,如果采用分时工作体制,探测盲区大,而有限的带宽也不适合使用分频工作体制;分波束体制能量被分割,降低了探测、通信距离;而全共享体制通过发射共享波形,使探测与通信同时同频段进行,该工作体制实现较为困难。但是,由于全共享体制系统共享程度高,频谱、能量利用率高,使其成为越来越受关注的研究方向。下面将重点介绍全共享体制的探测通信一体化,其实现流程图可简化描述为如下图 2 所示。

分时体制	分频体制	分波束体制	全共享体制
不同时间段分别发射探测与通信	不同频率分别实现探测与通信功能	不同波束分别实现探测与通信功能	发射波形同时具有探测与通信功能
优点: 实现简单、相互干扰小	优点: 相互干扰小、实现简单	优点: 探测、通信同时工作	优点: 同时工作、共享程度高
缺点: 探测更新率低、有盲区	缺点: 频带利用率低	缺点: 能量分割、探测距离下降	缺点: 实现复杂

图 1 雷达通信一体化常用工作体制

Fig. 1 Common working system of integrated radar and communication

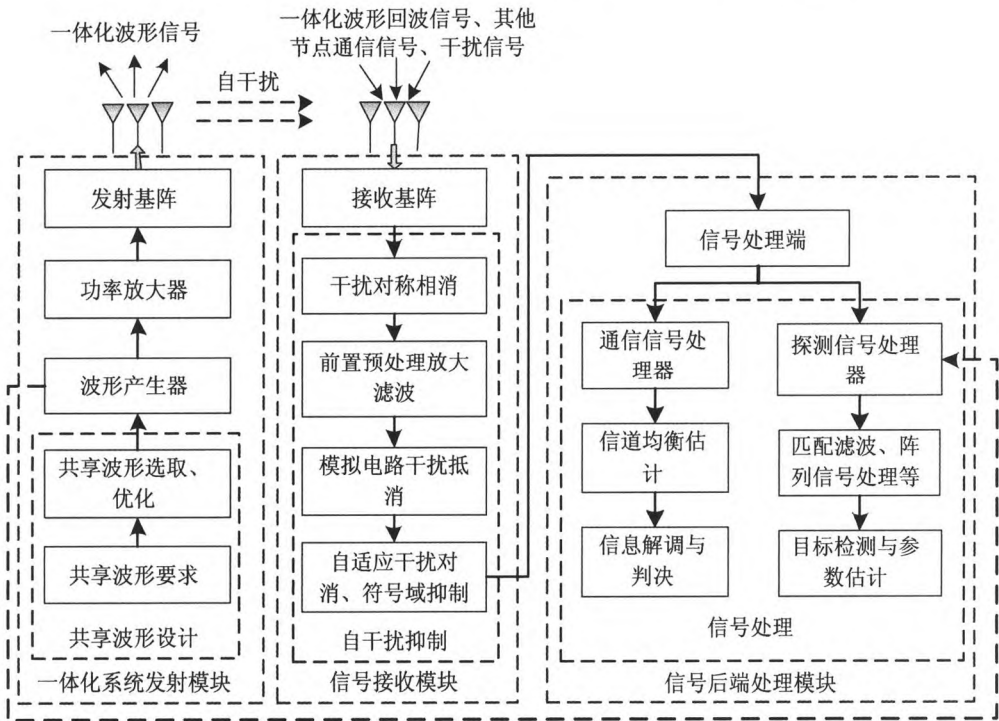


图 2 全共享体制下探测通信一体化系统流程图

Fig. 2 Flowchart of integrated detection and communication system under full sharing system

从图 2 可以看出,全共享体制的探测通信一体化主要有三个研究方向:(1)共享波形的设计,由于探测系统与通信系统的功能不同,导致探测波形与通信波形存在差异,而探测通信一体化共享波形需同时具备探测与通信功能;(2)自干扰抑制,全共享体制下,探测通信一体化探测与通信通常是同时进行的,单基地探测通信一体化接收端面临发射端泄漏信号的干扰,多基地探测通信一体化面临着直达波干扰;(3)信号处理,对接收信号进行处理,提取有效目标信息和准确的通信信息。下面从上述三个研究方向详细介绍探测通信一体化研究现状。

3 探测通信一体化研究现状

共享波形设计是实现探测通信一体化的基础,对后续的自干扰抑制与信号处理至关重要,好的波形可以提高自干扰抑制性能、增加通信传输速率和

降低信号处理难度。自干扰抑制是信号处理的关键,良好的自干扰抑制性能,能提高有效信号的信噪比,从而提高目标检测与参数估计性能,降低误码率,继而通过信号处理实现获取目标参数信息以及通信传输信息的最终目的。

3.1 全共享波形设计

根据共享波形设计方法,全共享体制可以分为三种:通信与探测波形叠加的全共享波形;基于探测波形的全共享信号;基于通信波形的全共享信号。

(1)通信与探测波形叠加的全共享波形

通信与探测波形先独立产生,然后直接叠加合成为全共享波形。叠加合成的全共享波形常采用两种相互正交的波形来分别实现目标探测与信息传输功能。2003 年 Mark Roberton 提出了基于 Chirp 信号的雷达通信一体化系统^[5],该系统中通信波形和雷达波形分别独立产生,全共享波形采用二者叠

加的方式形成,该系统以 Up-Chirp 信号作为通信波形,Down-Chirp 信号作为雷达探测波形,在接收端采用独立的接收机,但这两种信号间的干扰成为影响系统性能的新问题。传统探测系统通常采用线性调频信号(Linear frequency modulation, LFM),在其上叠加通信信号可以增强雷达系统的抗干扰能力和低截获概率^[6]。由于通信信号与探测信号直接叠加合成共享信号,因此信号间相互干扰严重,功率利用率低,且接收端信号分离困难。迄今为止,该方面研究成果相对较少。

(2) 基于探测波形的全共享波形

将通信信息调制到探测信号上,使探测信号成为传输信号的载体。常见的方式是利用探测信号脉冲间参数变化表示通信信息,如图 2 所示。脉冲的起始频率、终止频率、步进频率、相位、脉冲宽度、重复周期等参数都能表征通信信息。文献[7]通过对正交频分复用(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)信号脉间的步进频率的改变,将数据信息加载到信号上,利用脉间的随机步进频率传输数据,实现目标探测与信息传输的全共享信号。文献[8]将通信信号进行 BPSK 调制,再对线性调频信号进行相位调制,通过线性调频信号的相位表示通信信息。文献[9]采用同调频率、不同初始频率的 Chirp 信号实现二进制数据的传输,将通信信号隐藏在雷达信号中,提高信号的低截获概率。基于探测波形的全共享信号,通信调制实现受探测信号可变参数的限制,导致通信信息传输速率受限,且通信方向受限于探测波束方向。

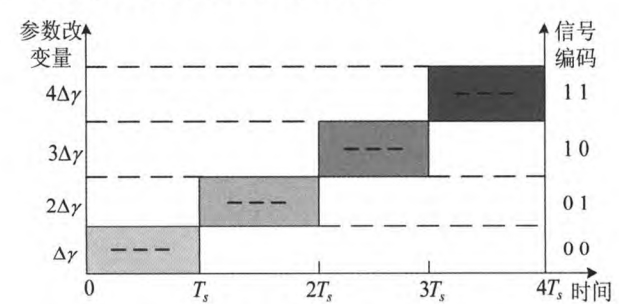


图 3 脉冲间参数变量表征通信信息的全共享信号

Fig. 3 Inter-pulse parameter variables represent communication information of the shared signals

(3) 基于通信波形的全共享波形

对现有的通信波形进行优化设计使其具备良

好的探测能力,或直接使用具有探测能力的通信波形作为共享波形。文献[10]分析了常见的水声无线通信调制信号的模糊度函数,比较其探测性能与抗混响能力。利用 LFM 信号的扩频通信信号进行共享波形的设计,其大带宽可以带来良好探测性能,文献[11]采用最小移频键控(Minimum shift keying, MSK)调制的 LFM 设计共享波形,其模糊度函数相比传统的 LFM 信号具有更好的速度与距离分辨率。OFDM 信号被广泛用于雷达通信一体化中,文献[12]研究了 OFDM 在车载雷达通信综合化中的应用,利用 OFDM 信号的频域特性,通过傅里叶变换处理得到目标速度、距离信息,且独立于调制数据,具有良好的通信性能。文献[13]提出了基于 MSK 直接序列扩频的雷达通信一体化信号,通过对通信中的数字基带信号进行扩频,使其具有良好的自相关性,从而满足雷达探测的要求。基于通信波形的共享波形,信号发射功率低,从而导致探测距离受限。

3.2 自干扰抑制研究现状

针对探测通信一体化中的全共享体制,采用收发分置基阵,信号的收发是同时的,接收端在接收有效信号的同时不可避免地会收到本机的发射泄漏信号,且泄漏信号一般比接收的有效目标回波高几个数量级,导致泄漏信号将有效信号淹没,甚至使接收机进入饱和阻塞状态,因此必须对泄漏的自干扰信号进行抑制,提高有效信号信噪比,以保证系统的探测与通信性能。

传统的自干扰抑制方法可以分为被动与主动两种方式^[14]。被动自干扰抑制主要通过减少接收与发射间的耦合,增加发射与接收间的隔离度,从而降低到达接收通道的自干扰信号功率,常用的方式有收发基阵分离与收发通道隔离。主动自干扰抑制利用已知的发射信号副本,重建自干扰信号,进而从接收通道中消除自干扰信号,达到自干扰抑制的目的,可以在模拟域与数字域实现自干扰抑制。

(1) 被动自干扰抑制

在干扰信号进入接收通道前,通过增加收发端的空间隔离度,降低接收通道中的自干扰信号功率。针对收发端之间的距离与自干扰抑制效果的关系,Slingsby W 在 1995 年采用 15 MHz 带宽、中心频率为 1.823 GHz 的信号对定向中继天线隔离度进

行了测试^[15],收发天线间距 5 m 时,天线隔离度能达到 85 dB。文献[16]利用 2.4 GHz 载频、0.625 MHz 带宽的 QPSK 调制信号做测试,测得在收发端间距为 10 cm、20 cm 和 40 cm 时的自干扰抑制能力分别为 34 dB、41 dB 和 44 dB。文献[17]中所提的半波长抵消法,利用两接收阵元与发射阵元位置共线,且两接收阵元相对于发射阵元距离差半个波长的空间结构,因此两阵元接收的信号具有“等幅同相”特性,利用这一特性进行抵消,达到 15~30 dB 的抵消性能。从上面的研究中可以看出,被动自干扰抑制主要通过增加收发基阵空间隔离度进行自干扰抑制。

(2) 主动自干扰抑制

由于受系统物理结构的限制,系统空间隔离度往往有限,因此利用被动自干扰抑制往往不易实现,而主动自干扰抑制一般不需考虑系统结构问题,主要分为模拟域自干扰抑制和数字域自干扰抑制两种。

模拟域自干扰抑制主要根据发射副本信号,利用延迟器、衰减器以及移相器等重建反相自干扰信号,将重建的反相自干扰信号与接收信号进行相减实现自干扰抵消。文献[18]利用 Quellan 公司的 QHx220 芯片,将发射和接收信号作为输入,通过调节芯片内部的衰减器和移相器实现自干扰抑制,在 530 MHz 频段上实现 30 dB 的自干扰抑制效果。文献[19]指出,采用移相的方法,对 5 MHz 带宽的自干扰信号有 50 dB 的抑制效果,但对于 100 MHz 带宽的自干扰信号,抑制性能下降,仅有 25 dB,且抑制后的信号频带有较大波动。

数字域主动自干扰抑制,主要在模拟信号量化为数字信号后进行,以发射信号副本为参考,以自干扰信号为输入,估计出干扰信道的时延、幅度、相位因子,进而重建自干扰信号,再将其从总接收信号中减去实现自干扰抑制。Nasr 等人^[20]通过叠加训练序列,利用最小二乘准则估计出自干扰信道的单位冲激响应,进而重建自干扰信号,实现自干扰抑制,达到 20 dB 的自干扰抑制能力。Zhou 等人^[21]在发射信号中插入 PN 序列,利用 PN 序列良好的相关性,基于 PN 序列的自干扰信道估计精度比基于发射信号本身的自干扰信道估计精度高,并且能获得更好的自干扰抑制能力。此外,自适应滤波也可

以用来抵消原始输入中的干扰信号,其核心是自适应抵消器,关键在于准则的选取。Zhang 等人^[22]分析了 LMS 与 NLMS 两种自适应算法在输入为白色参考信号时的自适应抵消性能,当迭代步长较大时,NLMS 算法较 LMS 算法收敛速度快,但迭代步长较小时,LMS 算法较 NLMS 算法有较好的抵消性能。Cho 等^[23]在数字域采用自适应滤波法,提出了一种新的子带自适应滤波算法,利用子带滤波器选取合适的子带,确保每次迭代的均方差最小,从而保证算法的收敛性与稳定性。

(3) 多级干扰抑制

为了提高系统自干扰抑制效果,需要联合使用几种干扰抑制方法,形成多级干扰抑制方式。多级干扰抑制根据信号传输过程,分别在信号接收端、模拟电路以及数字电路三级进行,如图 4 所示,各级的抑制方法如前文所提的被动和主动自干扰抑制方法相同。文献[24]指出要想使接收与发射机之间的隔离度增强,需要同时在模拟域与数字域进行自干扰抑制处理。Rice 大学研究报告^[25]中利用视频与数字联合方法以及天线隔离技术,达到总共 78 dB 的干扰抑制效果。斯坦福大学利用环路器做收发共用天线,同时采用模拟、数字主动干扰抑制得到 110 dB 的总干扰消除能力^[26]。系统总的自干扰抑制能力不等于各级消除的叠加,各级消除能力存在相互制约,被动自干扰抑制中的空间隔离可以影响模拟域自干扰抑制能力,模拟域信号的某些参数以及模拟器件的性能影响到数字域自干扰消除能力。

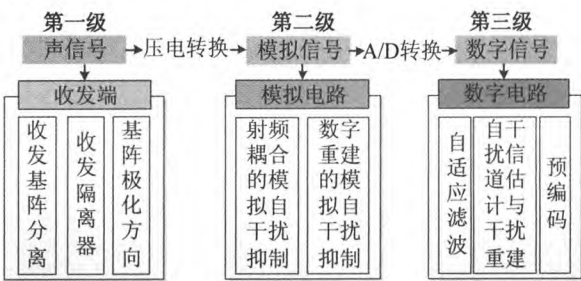


图 4 多级自干扰抑制示意图

Fig. 4 Schematic of multi-level self-interference cancellation

3.3 共享信号处理研究现状

经过自干扰处理后,接收信号信噪比得到提高,如何高效、准确地对接收信号进行正确解调与目标信息提取是处理端所面临的问题。

(1)共享信号通信处理

文献[27]研究了 M 序列的相位编码 OFDM 一体化信号,通过权值加窗对接收数据进行傅里叶变换并对信号解调,有效降低了峰值旁瓣比,提高信噪比。文献[28]利用扩频序列,分析 BPSK 调制的 MIMO 阵列的一体化共享信号处理,给出误码率与接收基阵方位和距离的关系。文献[29]提出了一种启发式算法,实现雷达通信一体化接收信号的自相关与互相关的最小化,并使得解调数据的均方相关值最小。传统通信系统中,为了从接收信号中准确解调出通信信息,需要对信道进行估计,减少信号衰落与码间干扰,从而减少误码率。对探测通信一体化共享信号的通信处理可以借鉴传统的通信处理方法,由于水下信道的复杂多变,水声通信实现较为困难,以水声通信处理技术为例,文献[30]提出通过联合多通道判决反馈均衡器和二阶数字锁相环,实现高速率的相干水声通信。对于正交频分复用信号,文献[31]提出先利用探测信号进行多普勒因子估计,然后根据多普勒因子对信号进行重采样,消除载波间干扰。文献[32]中 OFDM 系统提出一种迭代载波频偏估计和信道估计的方法。Turbo 均衡在水声通信中应用十分广泛,在单载波、OFDM 以及 MIMO 通信系统中多有应用。这些处理方法应用于探测通信一体化的通信信号处理中,实现对接接收信号的正确解调,降低信息传输误码率。

(2)共享信号探测处理

对于一体化共享信号的目标探测方法,文献[33]提出基于通信信息补偿,采用子空间投影方法实现对目标的距离与多普勒的超分辨估计。文献[34]研究了 OFDM 雷达信号处理及目标检测方法,针对高速运动目标,较单载波调制雷达有更好的脉冲压缩性能与检测概率。目前探测通信一体化探测方面的信号处理方法,都是基于传统目标检测与参数估计的方法,但不同于传统的探测信号,一体化共享信号具有它独特的特性。共享信号为持续时间较长的连续信号,可以看作一种连续波雷达或声纳,因此一些连续波处理方法可以应用到一体化共享信号探测处理中,Murphy 等针对连续波主动声纳脉冲持续时间接近脉冲重复间隔这一情况,提出了子带处理方法,从而获取更快的数据更新速率,

但其降低了输出信噪比^[35]。中国科学院声学研究所李锐等对连续波主动声纳信号与脉冲主动声纳信号的检测性能进行了讨论,给出了适用于多基地声纳系统协同探测的连续波主动声纳信号波形与信号处理方法^[36]。针对共享信号的处理还可以利用信号特性(如非圆特性、循环平稳特性等)提高目标探测性能。

4 陆上与水下探测通信一体化的区别

基于雷达的探测通信一体化技术研究时间较长,技术较为成熟,且已应用到实战中,而水下探测通信一体化相关研究处于起步阶段,相关研究几乎没有,因此可借鉴陆上雷达通信一体化技术进行水下探测通信一体化相关研究,但同时需要了解两者之间的区别与特点。

4.1 工作方式与环境

陆上探测通信一体化技术与水下探测通信一体化的实现方式存在明显差别,陆上依靠雷达,利用电磁波实现目标探测、定位及通信,而水下则依靠声纳,利用的是声波。电磁波与声波的特性如表 1 所示^[37-39],电磁波传播速度快、频率高、可用频带宽,且为具有偏振特性的横波,可携带更多的信息。声波速度慢、工作频率低、可用频带有限。由于电磁波在水中吸收衰减大,因此,声波是水下远距离探测、通信的唯一有效手段。

表 1 电磁波与声波对比

Tab. 1 Comparison between electromagnetic wave and acoustic wave

特性	电磁波	声波
介质依赖性	无需依赖介质、可在真空中传播	须依赖介质振动、真空中不能传播
空气中传播速度	3×10^8 m/s	340 m/s
水中传播速度	2.25×10^8 m/s	1490 m/s
典型工作频率	频率 3 MHz ~ 300 GHz	声纳频率 3 Hz ~ 97 kHz
波的特性	横波(有偏振)	纵波(无偏振)
水中吸收衰减	3 dB/m@ 10 kHz	1.1 dB/km@ 10 kHz

陆上探测通信一体化与水下探测通信一体化另外一个区别就是传输信道的不同,从而导致传播特性的不同^[37-39],如表 2 所示。

表 2 传输信道特点
Tab. 2 Characteristics of transmission channel

信道特性	空中电磁波	水下声波
介质均匀性	传播速度稳定,基本以直线传播。	水中声速受温度影响大,以曲线方式传播。
传播时延	传播速度快、时延小	传播速度慢、时延大
多径	多径时延小	多径时延大(大于 10 ms 量级),可达几十个符号长度。
多普勒	多普勒伸缩因子小,小于 10^{-5} (十倍音速)量级。	多普勒伸缩因子大,可达 10^{-2} (30kn 航速)量级。
时变、空变特性	移动通信中场景的变化; 短波的电离层反射变化等。	海面波浪高度、起伏程度的快速变化; 海水每日、每季的周期性变化等。

水声环境相对空中环境更为复杂,受介质流动、海洋洋流底部漫反射、水生生物等因素影响,其具有时-空-频变特性。首先水声传播速度受压力、温度和盐度影响,不同季节、不同水域,其传输特性差异明显,如图 5 所示,分别为典型的深海声速梯度和丹江口水库实测声速梯度^[39]。在浅海区域,传播距离远大于水深,声波在海面及海底被多次反射;在深海区域,由于声速在不同深度的变化,产生了声线弯曲现象,造成了水声中严重的多径干扰现象。声速比电磁波速度低 5 个数量级,大的传播时延(0.67 s/km)将极大地降低通信系统的吞吐量。同时,声波的低速传播和水下航行器的高速运动将使得 Doppler 频移比无线电传播中 Doppler 频移高几个数量级。这些使得水下探测通信一体的研究尤为困难。

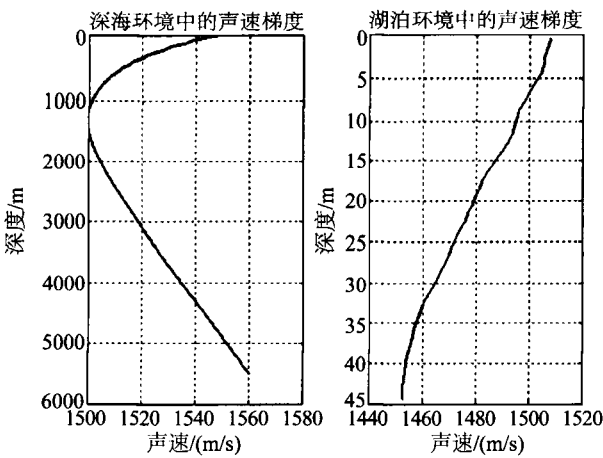


图 5 深海与湖泊环境中的声速梯度

Fig. 5 Sound velocity gradient in deep sea and lake

4.2 信号处理方法

由于陆上与水下探测通信一体化所选取的工作体制不同,陆上电磁波与水下声波传播特性、工作环境的不同,导致两者所需解决的问题、信号处

理方法的不同。

水声信道具有多径时延扩展长、衰落严重、多普勒效应明显等特点,这些信道特性会对通信信号造成线性与非线性失真、频率偏移、相位抖动等影响,因此在水下探测通信一体化的接收端,需要辅

以有效的均衡技术来消除这些影响^[40]。基于全共享体制的水下探测通信一体化,由于使用发射的通信信号作为主动照射源,与确定的主动探测发射信号不同,一体化共享信号需要根据通信信源信息进行调制编码,信号复杂,同时具有信号持续时间长、功率小、频带宽等特点,想要充分利用一体化共享信号进行目标检测与参数估计,还需要解决信号连续性、低信噪比、频带宽等问题。

基于雷达的探测通信一体化,多径时延对其影响微乎其微,信道均衡不是其研究重点。雷达通信一体化通过将通信信息加载到雷达信号上实现探测与通信功能,加载通信信息的雷达信号频谱将展宽,超过雷达的原始带宽,但原始带宽之外的频谱可能被分发给其他用户,且复杂的电磁环境,使得带外干扰严重,降低通信与探测性能。因此相互间的干扰抑制是雷达通信一体化需要考虑的。同时,在实现雷达通信一体化信号的设计方法中,扩频或 OFDM 技术都存在非恒定包络的问题,而雷达系统的功率放大器为动态变化范围较小的非线性放大器,一般为饱和放大,当设计的一体化信号通过功率放大器时会产生一定程度的非线性失真,频谱发生畸变,导致雷达与通信性能下降^[41]。因此减小非线性失真影响是雷达通信一体化所需处理的问题。

因此,对于水下探测通信一体化不能纯粹照搬陆上雷达通信一体化相关技术,应依据水下探测通信一体化实际应用环境特点、应用原理,结合陆上

雷达通信一体化、水下探测、水声通信已有的相关技术,研究解决水下探测通信一体化实现中所面临的三大问题。

5 水下探测通信一体化技术发展方向

水下对抗方式正从“平台密集型”向“传感器密集型”转换,通过在警戒监视海域布放大量节点,形成水下无线传感网络 (Underwater wireless sensor networks, UWSN),根据各网络节点获取的信息,并通过节点间信息的可靠传输实现信息交换、分发和融合,进而实现对目标探测、定位、跟踪和识别。在水下无线传感网络中各节点间的协同探测和通信,利用分布式的多节点信息融合,可获得比单一节点更好的检测性能、参数估计精度和容错能力。现有的水下节点中通信与探测系统是独立的,水声通信与水下探测作为水下信息获取、识别、传输和交换的重要技术,由于水声通信与水下探测在工作原理、系统结构、工作频率、硬件设备等方面具有一定的共性,因此将两者有机的集成起来,形成水下探测通信一体化是可行的^[42]。水下探测通信一体化技术使节点同时具备探测与通信功能,节约节点空间、降低节点能耗、提高系统信息化程度以及安全性,从而大大提高网络运行效率与安全性。

相比陆上雷达通信一体化,由于水声环境的复杂性,声波的低速传播以及时变的水声信道,使得水下探测通信一体化实现具有一定困难。由于陆上雷达通信一体化技术研究较早,可以给水下探测通信一体化的研究提供相关借鉴。水下探测通信一体化工作形式如图 6 所示。

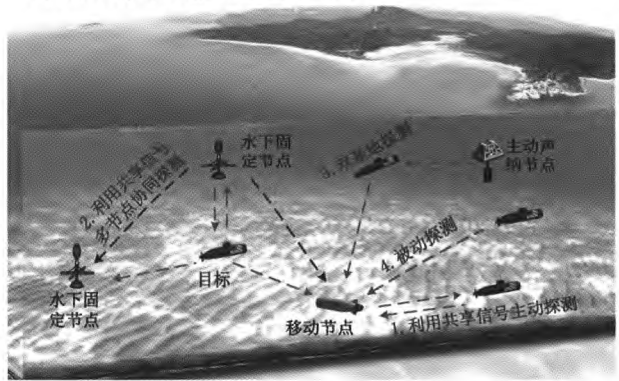


图 6 水下探测通信一体化工作形式示意图
Fig. 6 Working mode of integrated underwater detection and communication

水下探测通信一体化工作方式可以分为单基地与多基地工作模式。单基地工作模式下,节点在发射一体化共享信号实现信息传输的同时,接收目标反射回波,此时共享信号具有两种功能,实现信息传输,作为主动声纳照射源;多基地工作模式,节点利用其他节点发射的共享信号作为照射源进行目标探测,同时接收其他节点的通信信号,实现多节点的协同探测与通信。并且系统的安全性,以及信息化是系统在对抗中提高自身生存与应变能力的重要技术支撑。

5.1 单基地探测通信一体化技术

对于单基地探测通信一体化而言,根据节点的形式可以分为固定节点的探测通信一体化技术与移动节点的探测通信一体化技术两种。

(1) 固定节点的探测通信一体化技术

常见的固定节点有水面浮标,由于固定节点的位置相对固定,自噪声与环境噪声等因素相对稳定,因此对系统的影响相对较小,基于固定节点的探测通信一体化实现较为容易,作者所在课题组利用自研的水声通信机与探测系统搭建了固定节点探测通信一体化实验系统,如图 7 所示。该实验系统由上位机、探测通信发射换能器、探测通信接收水听器阵以及电子仓构成。系统采用收发分置方式,为了保证水平全向探测能力,接收阵配置为 6 元圆阵,系统内包含一个姿态传感器,以获得节点当前水平指向,结合探测系统给出的目标相对方位,可以给出目标相对于正北的绝对方位。该实验系统主要用于发射泄漏强度测量、空间隔离、自干扰抑制、共享信号的主动探测算法等原理性的实验与验证。

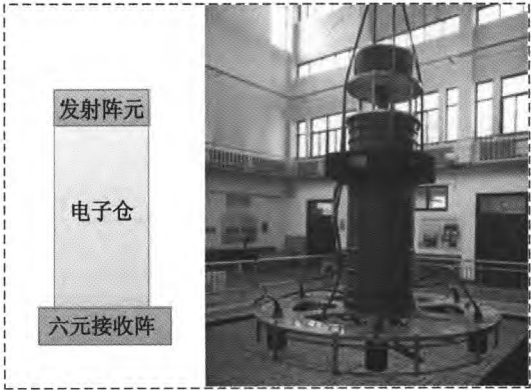


图 7 固定节点探测通信一体化实验系统结构图
Fig. 7 Structure diagram of the fixed node experimental system

(2)移动节点的探测通信一体化技术

在水下无线传感网络中,由于固定节点观测范围有限,无法机动,协同作业能力有限,因此需要加入移动节点,常见的移动节点有无人潜航器(unmanned underwater vehicle, UUV)。基于移动节点的探测通信一体化系统可组成一体化侦察、探测、打击网络,进行协同探测、通信作业,提高网络的探测性能、通信效率,扩大探测、通信范围,是值得研究发展的一个方向。作者所在课题组采用 UUV 搭载一体化探测通信系统,构成移动节点探测通信一体化实验系统,采用收发分置的换能器配置方案,发射换能器安装在 UUV 底部以保证全向发射,接收水听器阵配置在 UUV 的舷侧,其结构示意图如图 8 所示。

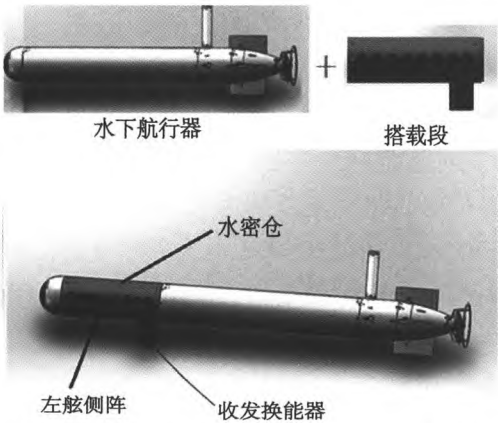


图 8 移动节点探测通信一体化实验系统结构图
Fig. 8 Structure diagram of the mobile node experimental system

移动节点探测通信一体化相对固定节点工作状态更为复杂,移动节点运动过程中存在自噪声干扰、多普勒频移等因素,使移动节点探测通信一体化的实现更为困难。

5.2 双基地探测通信一体化技术

随着各国对舰船隐身技术的研究以及船舶工程技术的发展,水下潜艇和水面舰船的目标强度大大减弱,在过去三、四十年内,潜艇的辐射噪声大约每年下降 0.5 ~ 1 dB,而声纳探测性能每年提高约 0.75 dB,如图 9 所示^[43],因此,为了提高对安静型舰艇的捕获概率,同时保证自身的“隐身”性,双基地或多基地声纳技术作为解决这一问题的有效手段受到研究者的关注。

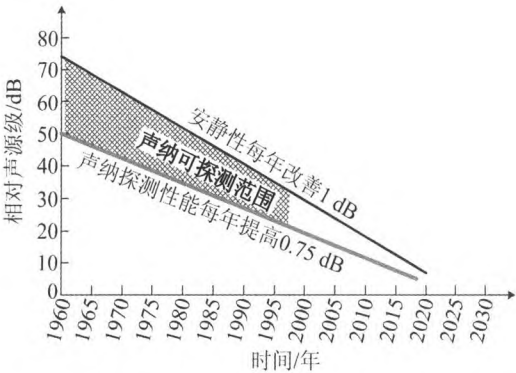


图 9 潜艇辐射噪声强度与声纳检测能力的趋势
Fig. 9 The trend of the radiation noise intensity of submarine and sonar detection ability

水下无线传感网络中利用多节点进行协同探测与通信是网络的主要任务,利用相邻节点发射的一体化共享信号作为目标照射源,实现信息传输的同时进行双基地探测。此时相比于单基地形式,其自干扰由发射泄漏信号变为直达波信号,且由于共享信号携带可变的通信信息,因此接收端无发射信号副本,不同的调制方式以及复杂的水声环境可能使信号发生畸变。如表 3 所示,目标反射强度为 10 dB,且目标位于发射端与接收端中间,当双基地距离为 1 km 时,接收系统需要 38 dB 的直达波抑制能力,才能获得 0 dB 的信干比,所以双基地探测通信一体化技术首先需要对直达波进行抑制,才能保证后续探测性能。对于双基地探测通信一体化,直达波可以视为发射端发射的通信信号,可以通过对直达波进行解调获取发射信号副本,再对接收信号进行直达波抑制提取目标有效回波,最后利用获取的发射信号副本对提取的目标回波进行处理,获取目标参数信息。

表 3 双基地不同距离下直达波与回波强度分析
Fig. 3 Strength analysis of direct wave and echo wave at different distances for bistatic base

双基地距离/km	0.5	1	2	3	5	10
直达波扩展衰减/dB	54	60	66	70	74	80
回波扩展衰减/dB	86	98	110	117	126	138
两者之差/dB	32	38	44	48	52	58

5.3 信息化的探测通信一体化技术

在海底无线传感网络中,固定节点、潜标、水面无人艇(USV)、水下滑翔机、水下无人航行器(UUV)等各个节点间的协同通信、探测使整个网络工作效率、性能得到提升。无论是固定节点还是移动节点的探

测通信一体化系统,对提高观测网的效率有着重要作用,一体化探测通信系统利用发射的信号主动感知水下环境与目标信息的特点,形成对水声环境、水声信道以及目标的初步认知学习,并将这种知识通过通信链路传递给其他节点或信息融合中心,形成认知学习、信息共享、学习认知的反馈环路,从而获取在复杂水声环境中最优的通信与目标探测性能。

水下信息对抗技术的快速发展,水下探测和水声通信等系统功能不断扩展,分布式、网络化、一体化是未来水下电子信息系统的三个重要发展方向^[44]。基于分布式、网络化、一体化的网络对抗系统是集探测与对抗、探测与通信于一体的系统。提高系统的一体化程度,整合有效信息资源,获取全方位的信息是探测通信一体化发展的方向。在组网中,探测通信一体化系统高效地对周围环境进行感知、与相邻节点信息交互,是促进网络系统信息化、智能化发展的基础。

5.4 安全的探测通信一体化技术

现代电子对抗对系统的安全性要求越来越高,水下探测通信一体化技术由于共享发射信号,所发射的共享信号同时具备通信与探测功能,从而使共享信号不同于常规单一的通信信号和探测信号。基于通信信号的水下探测通信一体化,利用宽带通信信号作为主动声纳照射源,具有良好的时间与频率分辨率,但通信发射声源级较传统主动声纳低,需要利用时间积累获取处理增益,才能达到一定的探测距离。由于较低的声源级,以及非传统的主动声纳发射信号形式,易误导敌方,降低敌方警戒性,一定程度上提高了系统的安全性。声波是水下远距离无线通信唯一的可靠载体,使得越来越多的海洋环境监测、资源开发以及水下军事目标的遥控、调度的实施严重依赖于水声通信,因此新形势下对水声通信技术除了稳健性外还提出了信息安全性的要求。基于探测信号的水下探测通信一体化技术,通过改变探测信号参数变量等方式,将通信信号调制到探测信号上,实现信息传递的目的,由于通信信息伪装到探测信号中,易误导敌方,降低通信信息的被截获率,提高通信信息的安全性。同时,如5.3节所提,水下探测通信一体化节点通过与其他节点、融合中心形成认知学习、信息共享、学习认知的信息反馈环路,能快速获取周围环境、目标信息,进而提高自身以及传感网络的安全性。因此,对水下探测通信一体化的安全性研究是需要的,也是可行的。

6 结论

本文对陆上雷达与水下声纳两种探测通信一体化形式进行了论述,首先介绍雷达通信一体化的分时、分频、分波束与全共享四种工作体制。由于雷达通信一体化研究较为成熟,而水下相关研究刚起步,因此从共享波形的三种设计方法、被动与主动的自干扰抑制方法、共享信号处理等三方面,主要总结了雷达通信一体化技术的研究现状与进展。为了快速开展水下探测通信一体化相关研究,借鉴雷达通信一体化技术,分析陆上与水下探测通信一体化在工作方式、环境以及信号处理方法上的区别,并结合水下探测通信一体化在水下无线传感网络中的应用特点,梳理了固定节点、移动节点的探测通信一体化技术、双基地探测通信一体化技术、具有安全性的探测通信一体化技术、信息化的探测通信一体化技术等四个水下探测通信一体化发展方向。由于水下环境的复杂性、声波传输速度慢等特点,使得水下探测通信一体化的实现比陆上更为困难,但探测通信一体化技术是各领域信息化系统集成化、网络化、智能化发展趋势中的必由之路。

参考文献

- [1] Mealey R M. A Method for Calculating Error Probabilities in a Radar Communication System[J]. IEEE Transactions on Space Electronics & Telemetry, 1963, 9(2): 37-42.
- [2] Coleman J O. Architecture for a Demonstration Radar-Communication Link[R]. Naval Research Lab Report, 1984.
- [3] Han L, Wu K. Multifunctional Transceiver for Future Intelligent Transportation Systems[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2011, 59(7): 1879-1892.
- [4] Antonik P, Bonneau R, Brown R, et al. Bistatic Radar Denial/Embedded Communications Via Waveform Diversity[C] // Radar Conference, 2001. Proceedings of the Atlanta, GA, USA: IEEE, 2001: 41-45.
- [5] Robertson M, Brown E. Integrated radar and communications based on chirped spread-spectrum techniques[C] // International Microwave Symposium Digest. IEEE, 2003: 611-614.
- [6] 徐任晖, 朱军, 陶昱. 基于雷达的通信系统研究进展[J]. 军事通信技术, 2014, 35(1): 37-42.
Xu Renhui, Zhu Jun, Tao Yu. Survey on the Radar-Based Communication System[J]. Journal of Military Communications Technology, 2014, 35(1): 37-42. (in Chinese)

- [7] Lou H, Wu Y, Ma Z, et al. A novel signal model for integration of radar and communication[C]//IEEE International Conference on Computational Electromagnetics. IEEE, 2017: 14-16.
- [8] Liu Z, Zhang W, Xu S. Implementation on the integrated waveform of radar and communication[C]//International Conference on Communications. IEEE, 2014: 200-204.
- [9] 杨慧婷, 周宇, 谷亚彬. 参数调制多载波雷达通信共享信号设计[J]. 雷达学报, 2018, 8(1): 54-63.
Yang Huiting, Zhou Yu, Gu Yabin. Design of Integrated Radar and Communication Signal Based on Multicarrier Parameter Modulation Signal [J]. Journal of Radar, 2018, 8(1): 54-63. (in Chinese)
- [10] Lu Jun, Zhang Qunfei, Shi Wentao. Detection Performance of Active Sonar Based On Underwater Acoustic Communication Signals[C]//International Conference on Signal Processing, Communications and Computing. IEEE, 2018.
- [11] Huang R Q, Zhao X L, Zhang Q, et al. Spectrum extension research of Radar-communication integrated waveform[C]//IEEE International Conference on Computer & Communications. IEEE, 2017: 1804-1808.
- [12] Sturm C, Wiesbeck W. Waveform Design and Signal Processing Aspects for Fusion of Wireless Communications and Radar Sensing[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(7): 1236-1259.
- [13] 刘少华, 黄志星. 基于扩频的雷达通信一体化信号的设计[J]. 雷达科学与技术, 2014, 1(1): 69-75.
Liu Shaohua, Huang Zhixing. Design of Integrated Radar-Communication Signal Based on Spread Spectrum [J]. Radar Science and Technology, 2014, 1(1): 69-75. (in Chinese)
- [14] Luo Long, Li Shaoqian. Influence of Full-Duplex Self-Interference Channel Measurement on Self-Interference Cancellation Capacity[C]//ICEIEC 2018: 63-66.
- [15] Slingsby W T, Mcgeehan J P. Antenna isolation measurements for on-frequency radio repeaters[C]//International Conference on Antennas & Propagation. IET, 2002: 239-243.
- [16] Duarte M, Dick C, Sabharwal A. Experiment-driven Characterization of Full-Duplex Wireless Systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 11(12): 4296-4307.
- [17] Mueller K. A New Digital Echo Canceller for Two-Wire Full-Duplex Data Transmission[J]. IEEE Transactions on Communications, 1976, 24(9): 956-962.
- [18] Radunovic B, Gunawardena D, Key P, et al. Rethinking Indoor Wireless Mesh Design: Low Power, Low Frequency, Full-Duplex[C]//IEEE 2010 Fifth IEEE Workshop On Wireless Mesh Networks-Boston, MA, USA, 2010: 1-6.
- [19] Jain M, Choi J I, Kim T, et al. Practical, real-time, full duplex wireless[C]//International Conference on Mobile Computing & Networking. ACM, 2011: 301.
- [20] Nasr K, Cosmas J. Performance of an Echo Canceller and Channel Estimator for On-Channel Repeaters in DVB-T/H Networks[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2007, 53(3): 609-618.
- [21] Zhou Y, Ge M, Ji S. Echo cancellation research of channel estimation based on PN sequence[J]. Application of Electronic Technique, 2012, 2(1): 871-875.
- [22] Zhang S, Zhang J, So H. Mean square deviation analysis of LMS and NLMS algorithms with white reference inputs[J]. Signal Processing, 2017, 131: 20-26.
- [23] Cho J, Baek H. Variable step-size sign subband adaptive filter with subband filter selection[J]. Signal Processing, 2018, 152: 141-147.
- [24] Chen S, Beach M A, Mcgeehan J P. Division-free duplex for wireless applications[J]. Electronics Letters, 1998, 34(2): 147-148.
- [25] Duarte M, Sabharwal A. Full-duplex wireless communications using off-the-shelf radios: Feasibility and first results[C]//In Proceeding of Asilomar, 2010: 1558-1562.
- [26] Bharadia D, McMilen E, Katti S. Full duplex radios[C]//In Proc. ACM SIGCOMM, 2013: 1-2.
- [27] Liu Y, Liao G, Yang Z, et al. Multiobjective optimal waveform design for OFDM integrated radar and communication systems[J]. Signal Processing, 2017, 141: 331-342.
- [28] Nusenu S Y, Wang W Q, Basit A. Time-Modulated FD-MIMO Array for Integrated Radar and Communication Systems[J]. IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters, 2018, PP(99): 1-1.
- [29] Jamil M, Hans-Jürgen Zepernick, Yang X S. Sequence optimization for integrated radar and communication systems using meta-heuristic multiobjective methods[C]//Radar Conference. IEEE, 2017: 0502-0507.
- [30] Stojanovic M. Recent advances in high-speed underwater acoustic communications[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1996, 21(2): 125-136.
- [31] Wan L, Wang Z, Zhou S, et al. Performance Comparison of Doppler Scale Estimation Methods for Underwater Acoustic OFDM[J]. Journal of Electrical and Computer Engineering, 2012, 1(1): 1-11.
- [32] Kang T, Iltis R A. Iterative Carrier Frequency Offset and Channel Estimation for Underwater Acoustic OFDM Systems[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communica-

tions, 2008, 26(9): 1650-1661.

[33] 刘永军, 廖桂生, 杨志伟. 一种超分辨 OFDM 雷达通信一体化设计方法[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(2): 425-433.

Liu Yongjun, Liao Guisheng, Yang Zhiwei. A Super-resolution Design Method for integration of OFDM Radar and Communication[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2016, 38(2): 425-433. (in Chinese)

[34] 顾陈, 张劲东, 朱晓华. 基于 OFDM 的多载波调制雷达系统信号处理及检测[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(6): 1298-1300.

Gu Chen, Zhang Jindong, Zhu Xiaohua. Signal Processing and Detecting for Multicarrier Modulated Radar System Based on OFDM[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2009, 31(6): 1298-1300. (in Chinese)

[35] Murphy S, Hines P. Sub-band processing of continuous active sonar signals in shallow water[C]//IEEE Oceans, Genoa, Italy, May 2015.

[36] 李锐, 安俊英, 成刚. 连续主动声纳信号在高刷新率目标探测中的应用[J]. 声学技术, 2017, 36(5): 275-276.

Li Rui, An Junying, Cheng Gang. Study on continuous active sonar signal in target detection with high refresh rate[J]. Technical Acoustic, 2017, 36(5): 275-276. (in Chinese)

[37] Stojanovic M, Preisig J. Underwater acoustic communication channels: Propagation models and statistical characterization[J]. IEEE Communications Magazine, 2009, 47(1): 0-89.

[38] 冯立峰, 王天堃. 声波与光波(电磁波)传播特性的对比[J]. 哈尔滨师范大学自然科学学报, 2015, 31(5): 57-60.

Feng Lifeng, Wang Tiankun. The Comparison of Propagation Characteristics Between Acoustic Wave and Light Wave (Electromagnetic Wave) [J]. Natural Science Journal of Harbin Normal University, 2015, 31(5): 51-60. (in Chinese)

[39] 张玲玲. 水声通信系统 MIMO-OFDM 技术研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2017.

Zhang Lingling. Study on the Key Techniques of MIMO-OFDM Underwater Acoustic Communications[D]. Xi'an; Northwestern Polytechnical University, 2017. (in Chinese)

[40] He C, Jing L, Xi R, et al. Improving Passive Time Reversal Underwater Acoustic Communications Using Subarray Processing[J]. Sensors, 2017, 17(4): 937.

[41] 肖博, 霍凯, 刘永祥. 雷达通信一体化研究现状与发展趋势[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(3): 236-247.

Xiao Bo, Huo Kai, Liu Yongxiang. Development and Prospect of Radar and Communication Integration [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2019, 41(3): 236-247. (in Chinese)

[42] 卢俊, 张群飞, 史文涛. 水下探测通信一体化关键技术分析[J]. 水下无人系统学报, 2018, 26(5): 470-479.

Lu Jun, Zhang Qunfei, Shi Wentao. Analysis on the Key Technology of Integrated Underwater Detection and Communication[J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2018, 26(5): 470-479. (in Chinese)

[43] 黄海宁, 李宇. 水声目标探测技术研究现状与展望[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(3): 264-271.

Huang Haining, Li Yu. Research Status and Prospect of Underwater Acoustic Target Detection Technology [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(3): 264-271. (in Chinese)

[44] 姜秋喜. 网络雷达对抗系统导论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.

Jiang Qiuxi. Network Radar Countermeasure Systems; Integrating Radar and Radar Countermeasures[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010. (in Chinese)

作者简介



卢 俊 男, 1989 年生, 湖北黄冈人。西北工业大学航海学院博士研究生, 主要研究水下阵列信号处理、探测通信一体化技术。
E-mail: lujun8906@163.com



张群飞 男, 1968 年生, 浙江东阳人。西北工业大学航海学院教授, 博士生导师, 主要研究阵列信号处理、水下信号处理、水声通信及计算机仿真。
E-mail: zhangqf@nwpu.edu.cn



史文涛 男, 1985 年生, 陕西扶风人。西北工业大学航海学院副教授, 主要研究阵列信号处理、水下信号处理。
E-mail: swt1985@126.com



张玲玲 女, 1986 年生, 山西霍州人。西北工业大学航海学院助理研究员, 主要研究水声通信、水下信号处理。
E-mail: zhanglingling9999@163.com